茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾的亚致死效应

宋 亮[1,2], 章金明[2], 吕要斌[1,2,*]

(1. 浙江师范大学化学与生命科学学院, 金华 321004; 2. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 浙江省植物有害生物防控重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地, 杭州 310021)

摘要: 【目的】通过研究茚虫威和高效氯氰菊酯两种杀虫剂对小菜蛾 *Plutella xylostella* (L.)的亚致死效应, 进一步了解农药的杀虫机制, 同时为合理使用农药、减少农药给环境和农业生产带来的一系列不良影响提供理论依据。【方法】浸叶法测定茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾 2 龄幼虫的毒力; 选择茚虫威的 3 个实验浓度(TI-LC_{15}, TI-LC_{30}和 TI-LC_{50})和高效氯氰菊酯的 3 个实验浓度(TB-LC_{15}, TB-LC_{30}和 TB-LC_{50})分别处理小菜蛾 2 龄幼虫 48 h, 记录各虫态存活率和发育历期, 3 龄、4 龄幼虫及蛹的重量, 并记录单雌产卵量和成虫寿命; 应用特征年龄-龄期及两性生命表方法, 研究不同处理组小菜蛾后代的生长发育、存活率以及种群增长。【结果】TI-LC_{30}, TI-LC_{50}, TB-LC_{15}, TB-LC_{30}和 TB-LC_{50}处理组各虫态发育历期比对照组显著延长($P<0.05$), 3 龄、4 龄幼虫和蛹的重量以及单雌产卵量均显著低于对照组($P<0.05$), 但 TI-LC_{15}组小菜蛾 3 龄和 4 龄幼虫发育历期均显著低于对照组($P<0.05$)。TI-LC_{30}, TI-LC_{50}, TB-LC_{30}和 TB-LC_{50}组小菜蛾后代的总产卵期显著短于相应对照组($P<0.05$), 产卵量也都显著降低($P<0.05$); TI 和 TB 实验组小菜蛾后代种群内禀增长率 r_m、周限增长率 λ、净生殖率 R_0 以及总生殖率 *GRR* 都比对照显著降低($P<0.05$)。【结论】低剂量的茚虫威和高效氯氰菊酯能显著抑制处理当代小菜蛾的生长发育和生殖, 并对其下一代的生长发育及种群增长也有明显的抑制。

关键词: 小菜蛾; 茚虫威; 高效氯氰菊酯; 亚致死效应; 生长发育; 种群增长

中图分类号: Q965.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 0454-6296(2013)05-0521-09

Sublethal effects of indoxacarb and beta-cypermethrin on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae)

SONG Liang[1,2], ZHANG Jin-Ming[2], LÜ Yao-Bin[1,2,*] (1. College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base for Zhejiang Sustainable Pest and Disease Control, Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: 【Aim】In this study, the sublethal effects of indoxacarb and beta-cypermethrin on *Plutella xylostella* (L.) were investigated so as to further understand the mechanism of insecticides and provide a theoretical basis for proper application of pesticides and mitigating the damage to environment and negative effects on agriculture. 【Methods】Leaf dipping method was used to test the acute toxicity of indoxacarb and beta-cypermethrin to the 2nd instar larvae of *P. xylostella*, and the LC_{15}, LC_{30} and LC_{50} values of indoxacarb (designated as TI-LC_{15}, TI-LC_{30} and TI-LC_{50}, respectively) and beta-cypermethirn (designated as TB-LC_{15}, TB-LC_{30} and TB-LC_{50}, respectively) were determined. After the 2nd instar larvae of *P. xylostella* were exposed to the six lethal concentrations above for 48 h, the biological characteristics including the survival rate, developmental duration, and larval and pupal weight were recorded, the fecundity and adult longevity were also investigated, and the age-stage and two-sex life tables was established to analyze the subthal effects of indoxacarb and beta-cypermethrin on biological characteristics of the offsprings of *P. xylostella*. 【Results】The developmental duration in TI-LC_{30}, TI-LC_{50}, TB-LC_{15}, TB-LC_{30} and TB-LC_{50} groups were significantly longer than that of the control group ($P<0.05$), and the larval and pupal weight and fecundity tended to decrease ($P<0.05$). But the developmental duration of the 3rd and 4th instar larvae in TI-LC_{15} group was significantly shorter than that of the control group ($P<0.05$). The total oviposition periods of offsprings in TI-LC_{30}, TI-LC_{50}, TB-LC_{30}

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项"十字花科小菜蛾综合防控技术研究与示范推广"(201103021)

作者简介: 宋亮, 男, 1986 年 9 月生, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: songliangme@126.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: luybcn@163.com

收稿日期 Received: 2013-01-05; 接受日期 Accepted: 2013-03-03

and TB-LC_{50} groups were significantly shortened ($P < 0.05$). Meanwhile, the fecundity of these groups was significantly decreased compared to that of the control ($P < 0.05$). The mean values of the intrinsic rate of increase (r_m), finite rate of increase (λ), gross reproductive rate (*GRR*) and net reproductive rate (R_0) were significantly lower in all the treatment groups than in the control group ($P < 0.05$). 【Conclusion】The low concentrations of indoxacarb and beta-cypermethrin could restrain the growth and development of *P. xylostella*, decrease the fecundity of its parents and offsprings and reduce the population growth of its offsprings.

Key words: *Plutella xylostella*; indoxacarb; beta-cypermethrin; sublethal effects; growth and development; population growth

小菜蛾 *Plutella xylostella* (L.) 属鳞翅目(Lepidoptera)菜蛾科(Plutellidae),是世界性的危害十字花科植物的重要害虫,特别是对经济价值重大的卷心菜、菜花、花椰菜、白菜和萝卜等危害巨大(Talekar and Shelton, 1993)。

亚致死效应(sublethal effect)指的是一些昆虫接触到一定剂量(致死或非致死)的杀虫剂之后,存活个体在生理和行为上受到的影响,而亚致死剂量或浓度(sublethal dose/concentration)则是使供试昆虫不会产生明显致死作用的杀虫剂剂量或浓度(Desneux *et al*., 2007)。目前,防治小菜蛾危害主要还是依靠传统的化学防治,杀虫剂使用后,除了对小菜蛾的直接致死作用外,而且会随着小菜蛾接触杀虫剂剂量的差异及时间的推移,对部分存活个体存在着亚致死效应,如氟铃脲(hexaflumuron)对小菜蛾的亚致死效应表现为延长其卵、1 龄幼虫、2 龄幼虫和蛹的发育历期,缩短成虫寿命,减少产卵量,并且会降低种群内禀增长率 r_m 和净生殖率 R_0(Mahmoudvand *et al*., 2011);多杀菌素(spinosad)对小菜蛾的亚致死效应则表现为降低各龄幼虫的存活率,延长幼虫的发育时间,降低蛹重、化蛹率、羽化率以及产卵量,而且这种影响会持续到下一代,从而影响小菜蛾种群的增长(Yin *et al*., 2008);另有研究表明,氰戊菊酯(fenvalerate)对小菜蛾的亚致死效应则是降低了小菜蛾保幼激素酯酶(juvenile hormone esterase, JHE)的活性(Wei *et al*., 2010)。

茚虫威(indoxacarb)和高效氯氰菊酯(beta-cypermethrin)是目前生产上用于防治小菜蛾的两种主要杀虫剂,分别属于噁二嗪类和拟除虫菊酯类杀虫剂。这两种杀虫剂都是神经毒剂,但其作用机理不同,茚虫威通过阻断神经细胞钠离子通道,使靶标昆虫麻痹致死,而高效氯氰菊酯则通过延长钠离子通道开放时间,最终导致靶标昆虫兴奋过度而死(Bloomquist, 1996; Wing *et al*., 2000; McCann *et al*., 2001; 吴霞, 2002)。那么这两种作用机制不同的杀虫剂,对小菜蛾的亚致死效应有何不同呢?基于此本文系统评价了这两种杀虫剂对小菜蛾的亚致死效应,以期为更加有效地评估这两种杀虫剂对小菜蛾的防控效果提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫及饲养条件

供试小菜蛾采自浙江省温州市郊区农场,以甘蓝(京丰一号 *Brassica oleracea* L. var. *capitata* cv. Jing-feng No. 1)为寄主,在温度 25 ± 1℃、相对湿度 65% ± 5%、光周期 12L:12D 的人工气候室中饲养。待幼虫化蛹后,收集蛹并转移到养虫笼(长×宽×高 = 30 cm × 30 cm × 40 cm)中羽化、交配和产卵。笼内放置沾有蜂蜜水(10%)的棉花球用于成虫取食以补充营养;另外取 2~3 片新鲜甘蓝叶片,外包裹扎有针孔的透明保鲜膜,用于收集虫卵;每天添加蜂蜜水,更换甘蓝叶片和保鲜膜,直至所有成虫死亡。把收集的小菜蛾卵转移到无虫甘蓝苗上孵化,在人工气候室中饲养,条件如上所述,繁殖 5~6 代后供实验用。

1.2 供试药剂

供试药剂 4.86% 茚虫威 EC 和 19.16% 高效氯氰菊酯 EC 由广东省农业科学院植物保护研究所提供,由其使用质量可靠的原药配制成乳油,并经分析检测获得其有效含量。

1.3 供试药剂对小菜蛾的毒力的确定

本实验采用浸叶法(Zhao *et al*., 2002)测定茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾的毒力。以刚蜕皮的 2 龄幼虫作为试虫,在温度 25 ± 1℃、相对湿度 65% ± 5%、光周期 12L:12D 的条件下,药剂处理 48 h 后计算幼虫死亡率以及这两种药剂的毒力回

归方程和各自的 LC_{15}，LC_{30}及 LC_{50}值。

1.4　茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾生长发育的影响

实验设置对照组（CK）、茚虫威处理组（indoxacarb treatment group，TI）和高效氯氰菊酯处理组（beta-cypermethrin treatment group，TB），2 种杀虫剂处理组各设 3 个浓度组（LC_{15}，LC_{30}和 LC_{50}）进行实验，分别是记作 TI-LC_{15}，TI-LC_{30} 和 TI-LC_{50} 以及 TB-LC_{15}，TB-LC_{30} 和 TB-LC_{50}。用毛笔挑出体型近似的 400 ~ 500 头刚蜕皮的 2 龄幼虫，饥饿 2 h 后供试。同时，将新鲜嫩绿的甘蓝叶片剪成直径约 5 cm 的小圆片，分别浸入 LC_{15}，LC_{30}和 LC_{50}的茚虫威或高效氯氰菊酯药液中，10 s 后取出自然晾干，放入培养皿（直径 5.5 cm），然后按 1 头/皿接入幼虫，以蒸馏水作对照，每个处理设置 100 个重复。把培养皿放在温度 25 ± 1℃、相对湿度 65% ± 5%、光周期 12L∶12D 的培养箱中饲养 48 h，每隔 12 h 观察并记录存活个体各虫态的存活数目和发育历期，2 龄和 3 龄幼虫蜕皮 1 d 后秤重，待化蛹 1 d 后称蛹的重量，然后按 1 蛹/管转移到指形管（直径 2.5 cm，长 8.0 cm）中，每天观察一次羽化情况，记录羽化数目和蛹期。将同一天羽化的雌雄成虫放在指形管中配对产卵，每个处理配对 15 ~ 30 对，环绕管壁放一层透明的称量纸，便于收集卵并计数，管内放入一小片甘蓝叶，用于刺激雌虫产卵。此外，放置一个沾有 10% 的蜂蜜水的小棉花球补充成虫营养，每天更换小甘蓝叶及棉花球，记录成虫寿命，并统计称样纸和小甘蓝叶上的产卵数量，直至所有成虫死亡。

1.5　茚虫威和高效氯氰菊酯亚致死效应对小菜蛾后代种群动态的影响

随机从 1.4 节中 CK，TI-LC_{15}，TI-LC_{30} 和 TI-LC_{50}，以及 TB-LC_{15}，TB-LC_{30}和 TB-LC_{50} 7 组的配对产卵实验中各取 100 粒卵进行实验，每粒卵作为一个重复，孵化后单头饲养。具体方法是在培养皿（直径 5.5 cm，垫一片湿润的滤纸作保湿用）上放置一片新鲜嫩绿的小甘蓝叶片，将一粒卵接入到甘蓝叶上，用 Parafilm 膜封口。每天 8:00 – 10:00 和 20:00 – 22:00 观察卵的孵化及幼虫发育情况，记录各虫态数量及存活情况，化蛹后，雌雄配对，每个处理配对 15 ~ 30 对，记录产卵量和成虫寿命，方法同 1.4 节。

1.6　数据统计与分析

用 Polo Plus v2.0 软件计算茚虫威和高效氯氰菊酯的实验浓度值；用 SPSS v19.0 计算不同处理的小菜蛾各虫态的发育历期、幼虫和蛹的重量、单雌产卵量和雌雄成虫的寿命，并对相同指标进行单因素方差分析（Tukey 氏检验，显著性差异水平 P = 0.05），作多重比较。应用特征年龄-龄期及两性生命表分析软件（age-stage，two-sex life table analysis）（Chi and Liu，1985；Chi，1988）分析各处理小菜蛾后代各虫态数量和存活情况、产卵量和成虫寿命，计算发育历期、总产卵前期、总产卵期、产卵量和成虫寿命，以及特征年龄存活率和特征年龄繁殖力。使用 bootstrap 方法（Huang and Chi，2012）计算内禀增长率（intrinsic rate of increase，r_m）、周限增长率（finite rate of increase，λ）、净生殖率（net reproduction rate，R_0）、平均世代历期（mean generation time，T）、总生殖率（gross reproduction rate，GRR）。

2　结果

2.1　茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾的的毒力

茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾 2 龄幼虫毒力测定结果见表 1，选择茚虫威 TI-LC_{15}（0.18 mg/L），TI-LC_{30}（0.62 mg/L）和 TI-LC_{50}（2.27 mg/L），高效氯氰菊酯 TB-LC_{15}（32.21 mg/L），TB-LC_{30}（63.54 mg/L）和 TB-LC_{50}（127.42 mg/L）作为本研究的药剂浓度，用于后续实验。

2.2　茚虫威和高效氯氰菊酯对当代小菜蛾的亚致死效应

2.2.1　对小菜蛾幼虫和蛹的生长发育的影响：TI-LC_{15}组小菜蛾 3 龄和 4 龄幼虫发育历期分别为 1.32 和 2.27 d，显著短于对照组的 1.77 d（P < 0.01）和 2.42 d（P < 0.05），但蛹期显著延长；而 TI-LC_{30}和 TI-LC_{50}组小菜蛾 3 龄和 4 龄幼虫以及蛹的发育历期均明显长于对照（P < 0.05），并且随浓度升高而延长；高效氯氰菊酯处理组 3 龄幼虫历期分别为 2.03 d（TB- LC_{15}），2.32 d（TB- LC_{30}）和 2.12 d（TB-LC_{50}），4 龄幼虫历期分别是 2.75，2.86 和 2.67 d，蛹的发育历期分别为 4.34，4.45 和 4.34 d，均比对照（3 龄和 4 龄幼虫以及蛹的历期分别是 1.77，2.42和 3.92 d）显著延长，但 4 龄幼虫以及蛹的发育历期都不随着药剂浓度的升高而延长（图 1）。

表 2 说明，TI 组和 TB 组化蛹率均随实验浓度的升高而降低。如图 2 所示，TI 组存活的 3 龄和 4 龄幼虫的体重均呈现明显降低的趋势，其中 TI-LC_{15}

表 1 茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾 2 龄幼虫的毒力

Table 1 Toxicity of indoxacarb and beta-cypermethrin to the 2nd instar larvae of *Plutella xylostella*

农药 Insecticides	试虫数量 Number of larvae tested	斜率 ± *SE* Slope	χ^2 Chi-square value	*df*	浓度(95% CI) (mg/L) Concentration
茚虫威 Indoxacarb	480	0.94 ± 0.16	4.92	3	LC_{15} = 0.18 (0.001 – 0.941) LC_{30} = 0.62 (0.003 – 2.212) LC_{50} = 2.27 (0.132 – 6.361)
高效氯氰菊酯 Beta-cypermethrin	420	1.74 ± 0.23	4.99	4	LC_{15} = 32.21 (5.912 – 68.153) LC_{30} = 63.54 (18.224 – 113.206) LC_{50} = 127.42 (56.138 – 195.750)

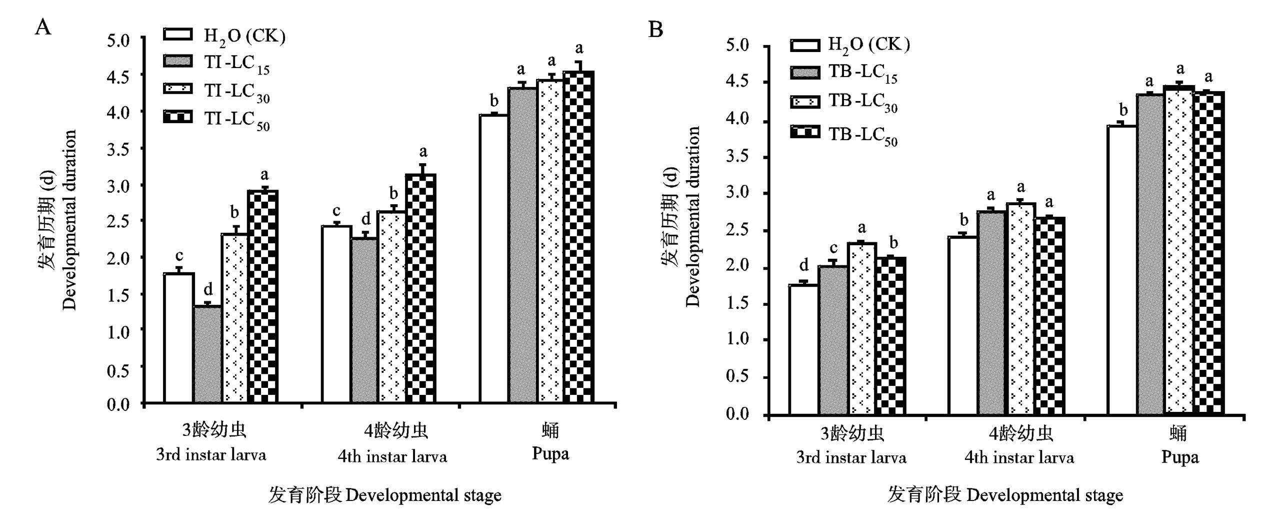


图 1 小菜蛾 2 龄幼虫受不同浓度茚虫威(A)和高效氯氰菊酯(B)处理后 3 龄和 4 龄幼虫以及蛹的发育历期

Fig. 1 Developmental duration of the survived 3rd and 4th instar larvae and pupae of *Plutella xylostella* exposed to different concentrations of indoxacarb (TI) (A) and beta-cypermethrin (TB) (B) at the 2nd instar

同一虫态的柱子上标注的不同字母表示差异显著($P < 0.05$, Tukey 氏检验); 图 2 同。Data of the same instar marked with different letters are significantly different ($P < 0.05$, Tukey's test). The same for Fig. 2.

表 2 小菜蛾 2 龄幼虫受茚虫威和高效氯氰菊酯亚致死剂量处理后蛹和成虫的发育参数

Table 2 Developmental parameters of the survived pupae and adults of *Plutella xylostella* exposed to different concentrations of indoxacarb (TI) and beta-cypermethrin (TB) at the 2nd instar

处理 Treatment	化蛹率(%) Pupation rate	羽化率(%) Emergence rate	单雌产卵量(粒) Number of eggs laid per female	孵化率(%) Hatch rate of eggs	成虫寿命 Adult longevity (d) 雌 Female	雄 Male
H_2O (CK)	95.35	93.90	200.58 ± 10.71 a	90.25	9.60 ± 0.52 a	13.20 ± 1.18 a
TI-LC_{15}	94.44	96.08	184.88 ± 14.31 a	84.09	9.88 ± 0.33 a	11.25 ± 1.26 a
TI-LC_{30}	79.95	81.95	191.20 ± 14.29 a	88.36	8.30 ± 0.64 a	12.53 ± 1.07 a
TI-LC_{50}	62.10	74.87	130.90 ± 9.56 b	80.56	9.24 ± 0.41 a	14.66 ± 1.12 a
TB-LC_{15}	97.65	94.46	191.05 ± 11.78 a	92.59	10.00 ± 0.68 a	13.55 ± 1.05 a
TB-LC_{30}	88.23	86.10	136.00 ± 3.61 b	79.76	9.38 ± 0.92 a	12.00 ± 1.20 a
TB-LC_{50}	71.66	81.95	143.18 ± 9.25 b	76.50	8.55 ± 0.75 a	11.10 ± 1.01 a

TI: 茚虫威 Indoxacarb; TB: 高效氯氰菊酯 Beta-cypermethrin. 以上数据显示的是平均值 ± 标准误; 同一列中平均值后面的不同字母表示相互之间差异显著($P < 0.05$, Tukey 氏检验)。Data are mean ± *SE*, and those within the same column followed by different letters are significantly different ($P < 0.05$, Tukey's test). 表 3 和表 4 同 The same for Tables 3 and 4.

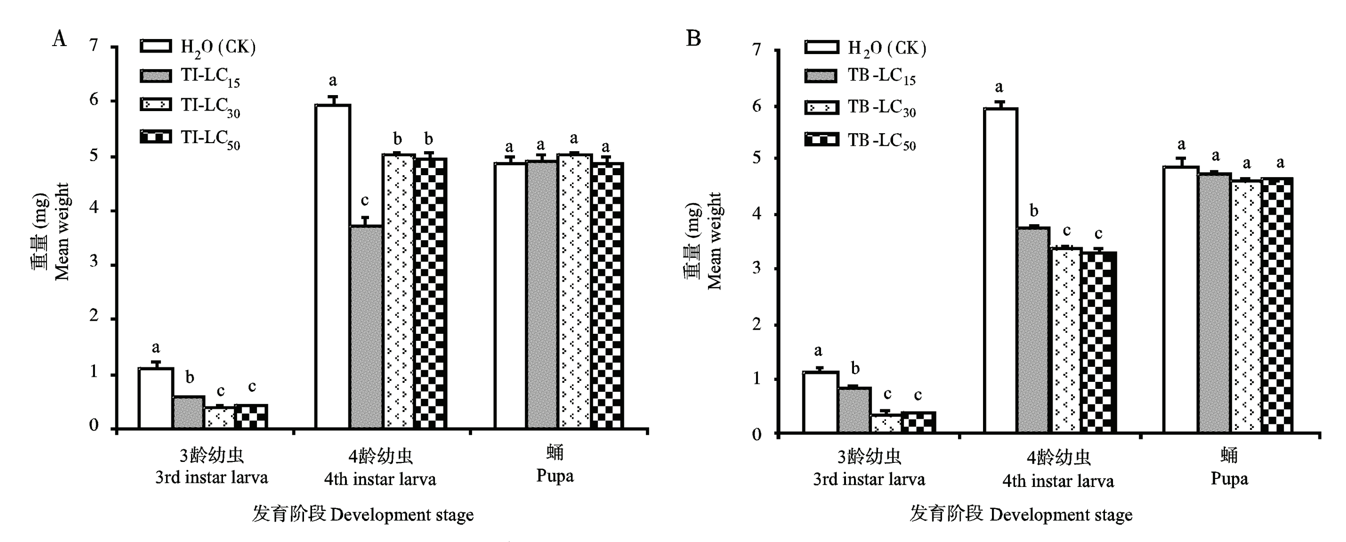


图 2　小菜蛾 2 龄幼虫受不同浓度茚虫威(A)和高效氯氰菊酯(B)处理后 3 龄和 4 龄幼虫以及蛹的重量

Fig. 2　Mean weight of the survived 3rd and 4th instar larvae and pupae of *Plutella xylostella* exposed to different concentrations of indoxacarb (TI) (A) and beta-cypermethrin (TB) (B) at the 2nd instar

组的小菜蛾 4 龄幼虫体重比对照组极显著降低($P<0.001$)，但 TI-LC_{30} 和 TI-LC_{50} 两组之间体重差异不显著；TB 组存活的 3 龄和 4 龄幼虫的体重呈现出随农药浓度增加而下降的趋势，但 TB-LC_{30} 和 TB-LC_{50} 处理之间的体重差异并不显著。同时发现 TI 和 TB 处理的小菜蛾蛹的重量均未受到影响($P>0.05$)。

2.2.2　对小菜蛾成虫的影响：不同浓度的茚虫威和高效氯氰菊酯处理后，小菜蛾成虫发育参数如表 2 所示，TI 组与 TB 组小菜蛾的羽化率与对照组比较均呈现下降趋势，TI-LC_{50} 组的单雌产卵量也比对照显著减少($P<0.05$)，幅度达 35%；在 TB 组中，同样可以观察到羽化率、卵的孵化率呈现下降趋势，而且 TB-LC_{30} 和 TB-LC_{50} 组单雌产卵量比对照显著减少($P<0.05$)，幅度达 30%。

2.3　茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾后代的亚致死效应

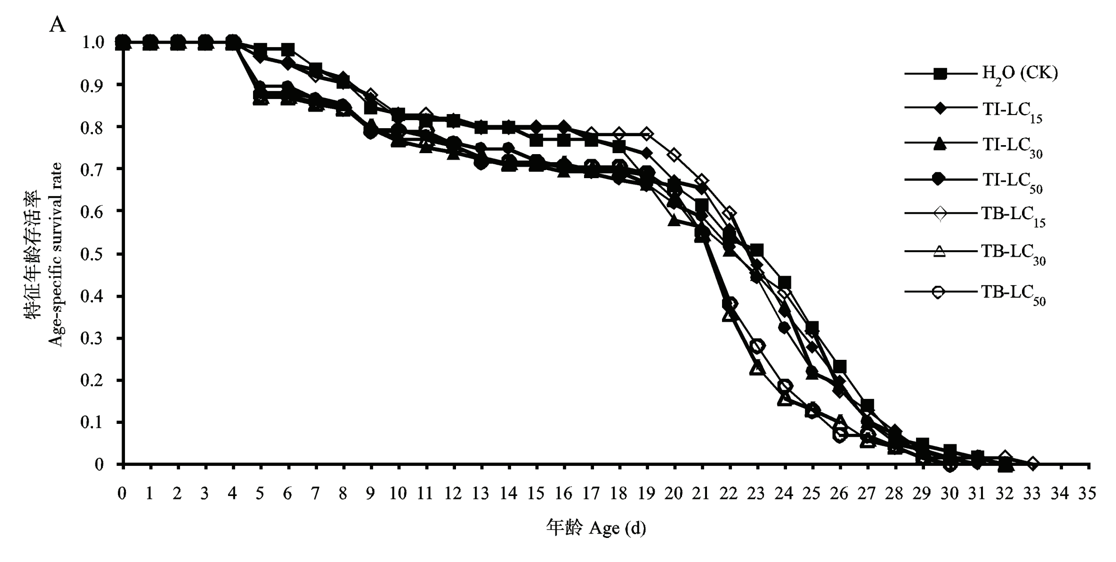
2.3.1　对小菜蛾后代不同虫态发育历期、雌虫繁殖力的影响：两种杀虫剂不同浓度处理小菜蛾后，其后代特征年龄存活率和繁殖力分别如图 3(A 和 B)所示，各处理组与对照组存活率曲线分布基本一致，但 TI-LC_{30}，TI-LC_{50}，TB-LC_{30} 和 TB-LC_{50} 4 个组的存活率下降更快，集中体现在由卵孵化成幼虫以及第 21 天产卵期临近结束的两个阶段，由此推测，茚虫威和高效氯氰菊酯主要对小菜蛾后代卵的孵化和成虫寿命影响较大。

特征年龄繁殖力差异显著，处理组的小菜蛾产卵高峰期相对对照组延后 1 – 3 d，由表 3 可知，与对照组相比，TI-LC_{30}，TI-LC_{50}，TB-LC_{30} 和 TB-LC_{50} 4 组总产卵期分别缩短了 19%，21%，39% 和 38%，单雌产卵量也分别减少了 21%，24%，26% 和 20%，而且 TB-LC_{30} 和 TB-LC_{50} 两组雌虫总产卵前期都比对照分别延长了 6% 和 7%，但雄虫寿命则比对照分别缩短了 34% 和 36%。

2.3.2　对小菜蛾后代种群动态参数的影响：受茚虫威和高效氯氰菊酯亚致死效应的影响，小菜蛾后代的种群参数变化如表 4 所示，茚虫威(TI)和高效氯氰菊酯(TB)处理组的内禀增长率(r_m)均比对照组低，并且 TB 组比 TI 组的 r_m 下降得更加明显，两种农药处理组内的 r_m 还随实验浓度的增加而降低；除此之外，各处理组的周限增长率(λ)、净生殖率(R_0)和总生殖率(GRR)都显著低于对照组($P<0.05$)，而平均世代历期(T)相应延长。

3　讨论

在本研究中，茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾的亚致死效应是不同的。高浓度的茚虫威能够抑制小菜蛾的发育，具体表现为发育历期延长、体重及化蛹率下降(图 1 和 2；表 2)。需要注意的是，茚虫威 LC_{15} 处理能够促进小菜蛾的发育，表现在缩短了小菜蛾幼虫的发育历期(图 1)，这可能是昆虫应激响应机制的作用，即低剂量促进，高剂量抑制。Sota 等(1998)和 Fujiwara 等(2002)均报道小菜蛾幼虫被低剂量的氰戊菊酯处理后，其繁殖力明显增强；还有研究表明，小菜蛾连续暴露在低剂量的多



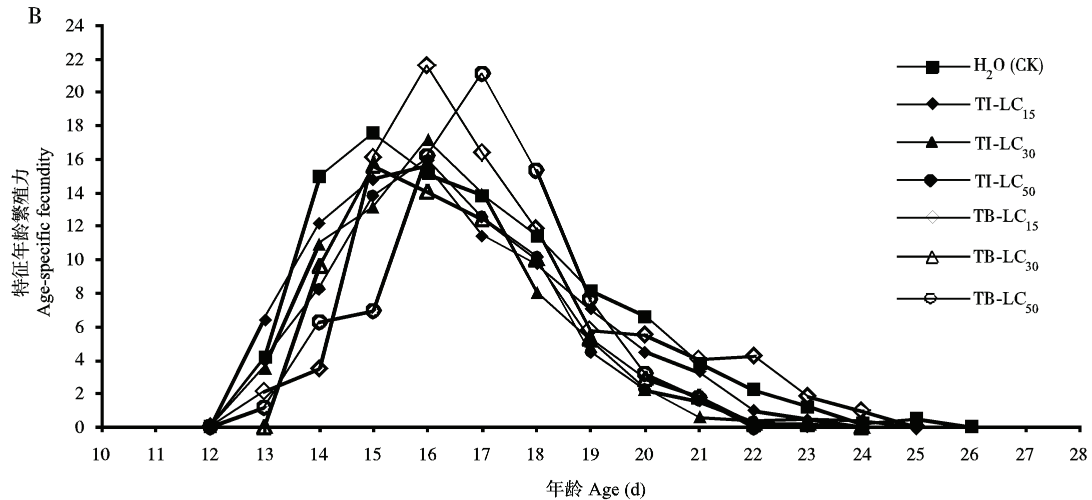


图 3 不同浓度茚虫威和高效氯氰菊酯处理小菜蛾 2 龄幼虫后其后代的特征年龄存活率(A)和繁殖力(B)

Fig. 3 Age-specific survival rate (A) and fecundity (B) of offsprings of *Plutella xylostella* exposed to different concentrations of indoxacarb (TI) and beta-cypermethrin (TB) at the 2nd instar

表 3 茚虫威和高效氯氰菊酯处理小菜蛾 2 龄幼虫后对其后代的亚致死效应

Table 3 Sublethal effects of indoxacarb (TI) and beta-cypermethrin (TB) on the offsprings of *Plutella xylostella* exposed to different concentrations of indoxacarb and beta-cypermethrin at the 2nd instar

处理 Treatment	发育历期(d) Developmental duration			总产卵前期(d) Total pre-oviposition period	总产卵期(d) Total oviposition period	产卵量 Number of eggs laid per female	成虫寿命(d) Adult longevity	
	卵 Egg	幼虫 Larva	蛹 Pupa				雌 Female	雄 Male
H_2O (CK)	3.22 ±0.06 a	6.25 ±0.05 a	3.95 ±0.06 a	13.42 ±0.05 a	9.13 ±0.31 a	218.36 ±17.68 a	7.59 ±0.44 a	11.75 ±0.37 a
TI-LC_{15}	3.24 ±0.07 a	6.27 ±0.05 a	3.94 ±0.06 a	13.45 ±0.06 a	9.22 ±0.21 a	214.00 ±12.08 a	7.74 ±0.48 a	11.71 ±0.37 a
TI-LC_{30}	3.21 ±0.07 a	6.34 ±0.04 a	3.99 ±0.06 a	13.53 ±0.06 a	7.38 ±0.42 b	171.71 ±10.07 b	7.90 ±0.46 a	11.68 ±0.42 a
TI-LC_{50}	3.22 ±0.06 a	6.50 ±0.06 a	3.91 ±0.06 a	13.63 ±0.06 a	7.25 ±0.32 b	166.14 ±10.71 b	7.85 ±0.45 a	11.73 ±0.42 a
TB-LC_{15}	3.46 ±0.02 a	6.26 ±0.05 a	4.01 ±0.06 a	13.74 ±0.04 a	6.80 ±0.51 c	207.36 ±13.97 a	7.47 ±0.47 a	11.06 ±0.59 a
TB-LC_{30}	3.17 ±0.03 a	6.85 ±0.07 b	4.20 ±0.08 a	14.23 ±0.07 b	5.59 ±0.16 d	162.24 ±7.89 b	7.55 ±0.39 a	7.73 ±0.49 b
TB-LC_{50}	3.28 ±0.04 a	6.87 ±0.06 b	4.26 ±0.09 a	14.41 ±0.07 b	5.68 ±0.62 d	174.81 ±17.90 b	7.62 ±0.41 a	7.81 ±0.38 b

表 4　茚虫威和高效氯氰菊酯处理 2 龄幼虫后小菜蛾后代的种群参数

Table 4　Life table parameters of the offsprings of *Plutella xylostella* exposed to different concentrations of indoxacarb (TI) and beta-cypermethrin (TB) at the 2nd instar

处理 Treatment	内禀增长率(d^{-1}) Intrinsic rate of increase r_m	周限增长率(d^{-1}) Finite rate of increase λ	净生殖率 Net reproduction rate R_0	平均世代历期(d^{-1}) Mean generation time T	总生殖率 Gross reproduction rate GRR
H_2O (CK)	0.2528 ± 0.0124 a	1.2877 ± 0.0159 a	74.2 ± 14.0 a	16.97 ± 0.27 a	99.2 ± 18.0 a
TI-LC_{15}	0.2495 ± 0.0133 b	1.2835 ± 0.0170 b	67.2 ± 13.2 b	16.79 ± 0.28 b	86.5 ± 16.2 b
TI-LC_{30}	0.2349 ± 0.0118 c	1.2648 ± 0.0149 c	52.6 ± 10.0 c	16.80 ± 0.26 c	75.2 ± 13.2 c
TI-LC_{50}	0.2331 ± 0.0118 c	1.2626 ± 0.0149 c	51.6 ± 9.8 c	16.84 ± 0.25 c	73.4 ± 13.0 c
TB-LC_{15}	0.2422 ± 0.1182 d	1.2741 ± 0.0150 d	71.4 ± 13.3 a	17.56 ± 0.27 d	92.9 ± 16.5 d
TB-LC_{30}	0.2286 ± 0.0118 e	1.2570 ± 0.0148 e	50.8 ± 9.4 d	17.11 ± 0.26 a	72.2 ± 12.3 e
TB-LC_{50}	0.2280 ± 0.0110 e	1.2568 ± 0.0137 e	55.8 ± 9.9 e	17.57 ± 0.27 d	79.0 ± 12.7 f

杀菌素下会刺激繁殖(Yin *et al.*, 2009)。但许多研究表明，农药亚致死效应对昆虫的存活或繁殖会产生不利影响，如有研究报道甲胺磷和西维因对小菜蛾的亚致死效应表现为降低了小菜蛾的繁殖力(Kumar and Chapman, 1984)；姜卫华等(2004)也报道用低浓度氟虫腈处理二化螟后可显著降低其产卵量；Yin 等(2008)也报道多杀菌素对小菜蛾的亚致死效应表现为降低了雌虫的产卵量；王建军等(2009)研究证明低浓度的茚虫威会降低斜纹夜蛾的产卵量。在本研究中，高效氯氰菊酯同样没有出现低剂量促进现象，小菜蛾受高效氯氰菊酯处理后，其发育受到抑制，表现为发育历期延长，幼虫体重、化蛹率和羽化率均降低，该结果和以下研究结果类似，Mahmoudvand 等(2011)研究报道低浓度的氟铃脲会延长延长小菜蛾卵、1 龄幼虫、2 龄幼虫和蛹发育历期；在 Yin 等(2008)有关多杀菌素对小菜蛾亚致死效应的研究中，以及 Wei 等(2010)研究氰戊菊酯对小菜蛾的亚致死影响中，均报道了小菜蛾的化蛹率、羽化率和蛹重显著降低。这些结果表明，低剂量的茚虫威有促进小菜蛾的生长发育的作用，但不会刺激增强它的繁殖力，而高效氯氰菊酯对小菜蛾的生长发育及繁殖力都具有抑制作用，目前对产生这些现象的机制尚不清楚，原因可能与药剂以及昆虫体内的解毒机制有关，有待于进一步研究。

除了对小菜蛾亲代的生物学特性有影响外，茚虫威和高效氯氰菊酯对其后代也有重要的影响。本研究发现，这 2 种杀虫剂在高浓度下可以抑制小菜蛾后代的生殖，表现为缩短雌虫产卵期并降低产卵量，同时雄虫的寿命也缩短(表 3)。在种群增长方面，这两种杀虫剂处理对小菜蛾后代种群的增长都有不利影响，表现为内禀增长率、周限增长率、净生殖率以及总生殖率减小，而平均世代周期延长(表 4)。有研究报道，LC_{25} 和 LC_{50} 的多杀菌素均能影响小菜蛾后代的种群参数，抑制种群增长(Yin *et al.*, 2008)，同时在 Mahmoudvand 等(2011)的研究中也发现 LC_{25} 的氟铃脲会降低小菜蛾的内禀增长率和净生殖率，从而影响种群动态，类似的结论在 Lashkari 等(2007)、Zhang 等(2012)的研究中也有报道。因此，我们推测茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾的亚致死效应在种群增长方面表现为抑制作用。

目前，关于茚虫威和高效氯氰菊酯对昆虫的亚致死效应的研究，多集中于天敌昆虫上，而对植食性昆虫的影响则很少。如 Golmohammadi 等(2009)报道茚虫威能改变草蛉 *Chrysoperla carnea* 1 龄幼虫的发育历期以及种群 R_0 值，Bostanian 等(2004)研究发现，茚虫威 LC_{50} 剂量使食虫盲蝽 *Hyaliodes vitripennis* 的腹足和腹部瘫痪，导致虫体严重收缩而死亡，还有研究报道异色瓢虫接触 0.1，0.25 以及 0.5 倍田间剂量(FR)的茚虫威后，种群增长均受到抑制(Galvan *et al.*, 2006)；Claver 等(2003)的研究表明，采取点滴法用浓度为 0.005%，0.01%，0.02%，0.03% 以及 0.04% 的高效氯氰菊酯处理猎蝽 *Acanthaspis pedestris* 后，其功能反应发生改变，捕食效率、交配率均下降。本文首次系统评价茚虫威和高效氯氰菊酯对小菜蛾的亚致死效应，不仅为科学评估这两种杀虫剂对小菜蛾的防控效果提供理论依据，同时也将为科学评估这两种杀虫剂对其他植食性害虫的防控效果提供借鉴。关于杀虫剂对小菜

蛾的亚致死效应，很多研究表明，多种杀虫剂对小菜蛾的生长、发育、生殖和种群参数产生了显著抑制影响，与本研究结果相似。如 Han 等(2012)报道，受 LC_{10} 和 LC_{25} 的氯虫苯甲酰胺处理后，小菜蛾的化蛹率、蛹重及羽化率降低，同时雌虫的产卵前期延长，卵孵化率也显著下降，后代的种群参数 r_m，R_0 和 λ 的值均显著减小，种群增长受到抑制，类似的结论在 Abro 等(1993)、Galvan 等(2005)的研究中也有报道。但是，另一些研究表明，有些杀虫剂对小菜蛾的种群增长却是有利的。如 Sota 等(1998)研究报道氰戊菊酯能刺激小菜蛾产卵，并使种群增长加快；Fujiwara 等(2002)的研究也发现 LC_{25} 的氰戊菊酯刺激了小菜蛾产卵；还有报道小菜蛾 4 龄幼虫受浓度为 10，50 和 100 mg/L 的灭多威(methomyl)处理后，其繁殖力增强、卵的体积增大，并且孵化率比对照高(Nemoto，1993)。造成这种现象的原因可能是杀虫剂作用方式和浓度不同，以及小菜蛾对不同杀虫剂的解毒机制不同，因此在施药过程中，杀虫剂对小菜蛾的亚致死作用应当给予重视。

本研究表明茚虫威和高效氯氰菊酯不仅对当代小菜蛾的生长、发育与生殖都具有显著影响，而且对小菜蛾后代的种群增长也有一定的影响，但是针对这两种杀虫剂对小菜蛾生长发育所产生的不同影响的机制，尚需进行深入的研究。

参考文献(References)

Abro GH, Corbitt TS, Christie PT, Wright DJ, 1993. Sub-lethal effects of abamectin on *Plutella xylostella* L. and *Spodoptera littoralis* Boisduval larvae. *Crop Protection*, 12: 39–44.

Bloomquist JR, 1996. Ion channels as targets for insecticides. *Annu. Rev. Entomol.*, 41: 163–190.

Bostanian NJ, Vincent C, Hardman JM, Larocque N, 2004. Toxicity of indoxacarb to two species of predacious mites and a predacious mirid. *Pest Manag. Sci.*, 60: 483–486.

Chi H, 1988. Life-table analysis incorporating both sexes and variable development rates among individuals. *Environ. Entomol.*, 17(1): 26–34.

Chi H, Liu H, 1985. Two new methods for the study of insect population ecology. *Acad. Sin., Bull. Inst. Zool.*, 24(2): 225–240.

Claver MA, Ravichandran B, Khan MM, Ambrose DP, 2003. Impact of cypermethrin on the functional response, predatory and mating behaviour of a non-target potential biological control agent *Acanthaspis pedestris* (Stål) (Het., Reduviidae). *J. Appl. Entomol.*, 127: 18–22.

Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM, 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annu. Rev. Entomol.*, 52: 81–106.

Fujiwara Y, Takahashi T, Yoshioka T, Nakasuji F, 2002. Changes in egg size of the diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) treated with fenvalerate at sublethal doses and viability of the eggs. *Appl. Entomol. Zool.*, 37(1): 103–109.

Galvan TL, Koch RL, Hutchison WD, 2005. Effects of spinosad and indoxacarb on survival, development and reproduction of the multicolored Asian lady beetle (Coleoptera: Coccinellidae). *Biol. Control*, 34: 108–114.

Galvan TL, Koch RL, Hutchison WD, 2006. Toxicity of indoxacarb and spinosad to the multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae), via three routes of exposure. *Pest Manag. Sci.*, 62(9): 797–804.

Golmohammadi GH, Hejazi M, Iranipour SH, Mohammadi SA, 2009. Lethal and sublethal effects of endosulfan, imidacloprid and indoxacarb on first instar larvae of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae) under laboratory conditions. *J. Entomol. Soc. Iran*, 28(2): 37–47.

Han WS, Zhang SF, Shen FY, Liu M, Ren CC, Gao XW, 2012. Residual toxicity and sublethal effects of chlorantraniliprole on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pest Manag. Sci.*, 68(8): 1184–1190.

Huang YB, Chi H, 2012. Assessing the application of the jackknife and bootstrap techniques to the estimation of the variability of the net reproductive rate and gross reproductive rate: a case study in *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) (Diptera: Tephritidae). *J. Agri. Fore.*, 61(1): 37–45.

Jiang WH, Han ZJ, Zhang GH, 2004. Sublethal effect of fipronil on resistant and susceptible rice stem borer (*Chilo suppressalis* Walker). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 27(2): 51–54. [姜卫华，韩召军，张国华，2004. 氟虫腈对二化螟抗、感种群的亚致死效应. 南京农业大学学报，27(2): 51–54]

Kumar K, Chapman RB, 1984. Sublethal effects of insecticides on diamondback moth *Plutella xylostella* (L.) *Pestic. Sci.*, 15(4): 344–352.

Lashkari MR, Sahragard A, Ghadamyari M, 2007. Sublethal effects of imidacloprid and pymetrozine on population growth parameters of cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae* on rapeseed, *Brassica napus* L. *Insect Science*, 14(3): 207–212.

Mahmoudvand M, Abbasipour H, Garjan AS, Bandani AR, 2011. Sublethal effects of hexaflumuron on development and reproduction of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Insect Science*, 18(6): 689–696.

McCann SF, Annis GD, Shapiro R, Piotrowski DW, Lahm GP, Long JK, Lee KC, Hughes MM, Myers BJ, Griswold SM, Reeves BM, March RW, Sharpe PL, Lowder P, Barnette WE, Wing KD, 2001. The discovery of indoxacarb: oxadiazines as a new class of pyrazoline-type insecticides. *Pest Manag. Sci.*, 57: 153–164.

Nemoto H, 1993. Mechanism of resurgence of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Japan Agricultural Research Quarterly*, 27: 27–32.

Sota N, Motoyama N, Fujisaki K, Nakasuji F, 1998. Possible

amplification of insecticide hormoligosis from resistance in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Appl. Entomol. Zool.*, 33(3): 435 –440.

Talekar NS, Shelton AM, 1993. Biology, ecology, and management of the diamondback moth. *Ann. Rev. Entomol.*, 38: 275 –301.

Wang JJ, Dong HG, Yuan LZ, 2009. Effects of indoxacarb at sublethal concentrations on the development and activities of detoxification enzymes of *Spodoptera litura*. *Journal of Yangzhou University* (*Agricultural and Life Science Edition*), 30(4): 85 – 89. [王建军，董红刚，袁林泽，2009. 亚致死浓度茚虫威对斜纹夜蛾生长发育及解毒酶活性的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版)，30(4): 85 –89]

Wei H, Wang J, Li HS, Dai HG, Gu XJ, 2010. Sub-lethal effects of fenvalerate on the development, fecundity, and juvenile hormone esterase activity of diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.). *Agricultural Sciences in China*, 9(11): 1612 –1622.

Wing KD, Sacher M, Kagaya Y, Tsurubuchi Y, Mulderig L, Connair M, Schnee M, 2000. Bioactivation and mode of action of the oxadiazine indoxacarb in insects. *Crop Protection*, 19: 537 –545.

Wu X, 2002. The latest research progress on mechanism of action of pyrethroid, fipronil and indoxacarb. *World Pesticide*, 24(2): 29 – 34. [吴霞，2002. 拟除虫菊酯、氟虫腈和茚虫威作用机制的最新进展. 世界农药，24(2): 29 –34]

Yin XH, Wu QJ, Li XF, Zhang YJ, Xu BY, 2008. Sublethal effects of spinosad on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Crop Protection*, 27: 1385 –1391.

Yin XH, Wu QJ, Li XF, Zhang YJ, Xu BY, 2009. Demographic changes in multigeneration *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) after exposure to sublethal concentrations of spinosad. *J. Econ. Entomol.*, 102(1): 357 –365.

Zhang Z, Li JH, Gao XW, 2012. Sublethal effects of metaflumizone on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Journal of Integrative Agriculture*, 11(7): 1145 –1150.

Zhao JZ, Li YX, Collins HL, Gusukuma-Minuto L, Mau RFL, Thompson GD, Shelton AM, 2002. Monitoring and characterization of diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) resistance to spinosad. *J. Econ. Entomol.*, 95(2): 430 –436.

(责任编辑：赵利辉)